

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición	XVII
Capítulo 1 Generalidades	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Definiciones en control.....	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>).....	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>).....	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos.....	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
Capítulo 2 Transmisores	51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos.....	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos.....	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas.....	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos.....	58
2.3 Transmisores electrónicos.....	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia.....	58
2.3.1.2 Transformador diferencial.....	60
2.3.2 Transmisores digitales.....	60
2.4 Comunicaciones.....	65
2.5 Comparación de transmisores.....	69

Capítulo 3	Medidas de presión	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción	223
	6.2	Termómetro de vidrio	224
	6.3	Termómetro bimetalico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características.....	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad.....	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos	308
7.1.3		Densidad y peso específico	310
	7.1.3.1	Introducción	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia	334
	7.1.5.1	Introducción	334
	7.1.5.2	Viscosímetros	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad	349
	7.2.2	pH	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo 8		Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas	366
	8.1.2.1	Válvula de globo	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento.....	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de vál- vulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas.....	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso.....	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos.....	487
9.3.1	Control todo-nada.....	487
9.3.2	Control flotante.....	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado.....	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado.....	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático.....	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos.....	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales.....	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada.....	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo.....	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo.....	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático.....	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control.....	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control.....	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada.....	534
9.8.3	Programadores.....	537
9.8.4	Control de relación.....	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida.....	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos.....	549
9.8.9	Controladores no lineales.....	551

	9.8.10 Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
	9.9.1 Introducción.....	554
	9.9.2 Nivel de energía de seguridad.....	555
	9.9.3 Mecanismos de la ignición en circuitos de baja tensión.....	556
	9.9.4 Clasificaciones de áreas peligrosas.....	558
	9.9.5 Normas.....	560
	9.9.6 Barreras Zener.....	560
	9.9.7 Barreras galvánicas.....	562
	9.9.8 Factores de seguridad.....	562
9.10	Control por computador.....	563
	9.10.1 Generalidades.....	563
	9.10.2 Control DDC.....	565
	9.10.3 Control supervisor.....	568
	9.10.4 Control distribuido.....	570
	9.10.5 Sistemas de control avanzado.....	574
	9.10.6 Sistemas expertos.....	580
	9.10.7 Control por redes neuronales.....	583
	9.10.8 Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>).....	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos.....	601
	10.1 Introducción.....	601
	10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración.....	602
	10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
	10.4 Calibración de instrumentos de temperatura.....	614
	10.5 Comprobación de válvulas de control.....	619
	10.6 Aparatos electrónicos de comprobación.....	620
	10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
	11.1 Generalidades.....	625
	11.2 Calderas de vapor.....	625
	11.2.1 Control de combustión.....	626
	11.2.2 Control de nivel.....	629
	11.2.3 Seguridad de llama.....	632
	11.3 Secaderos y evaporadores.....	632
	11.4 Horno túnel.....	635
	11.5 Columnas de destilación.....	637
	11.6 Intercambiadores de calor.....	638
	11.7 Control del reactor en una central nuclear.....	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos.....		645
	A.1 Generalidades.....	645
	A.2 Análisis dinámico de los transmisores.....	658

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias		733
Glosario		741